

燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制 VII:以 2×600 MW 机组为例分析讨论电除尘选型和改造

梁志宏¹, 李栓宝¹, 陈俊峰¹, 张金海¹, 陈宝瑞¹, 薛祥忠¹, 王仕龙², 闫克平³

1. 神华国能王曲电厂, 潞城 047500
2. 神华国能集团有限公司, 北京 100033
3. 浙江大学生物物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027

摘要 分析了2×600 MW 机组所配套的两台双室五电场电除尘器(ESP)的设计、选型和改造。每台电除尘配套20台高压电源、一台炉配40台高压电源,改造工作不仅包括更换原80台单相电源为80台三相电源,而且将第一和第二电场的极板、极线及振打系统全部做了更换,改造后电除尘出口PM₁₀和PM_{2.5}(粒径分别低于10 μm和2.5 μm的颗粒物)的排放分别低于15 mg·Nm⁻³和1.0 mg·Nm⁻³,PM_{2.5}占PM₁₀的比例在6.5%~7.5%,与改造前比较PM_{2.5}下降了95%以上。

关键词 电除尘;细颗粒物;三相电源

王曲电厂位于山西长治市,属于《GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准》排放控制重点地区,燃煤电厂颗粒物排放要求不高于20 mg·Nm⁻³的排放限值。为改善环境空气质量和降低污染源的排放强度,神华国能要求王曲电厂开展600 MW 等级燃煤电厂环保示范建设实现颗粒物排放不高于5 mg·Nm⁻³,其中PM_{2.5}(粒径2.5 μm的颗粒物)排放不高于2.5 mg·Nm⁻³。对三大污染物NO_x、SO₂和尘的排放控制分别是采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)法还原NO_x、石灰石湿法(flue gas desulfurization, FGD)吸收SO₂及电除尘(electrostatic precipitator, ESP)收尘,环保电厂全面实现超低排放^[1]。

电厂2×600 MW 机组分别配置两台卧式双室五电场电除尘器,改造工作包括对第一、第二电场的阴阳极线极板和振打系统拆除改造、对原电除尘所配套的80台单相高压电源更换为80台ZH三相电源及其8台低压控制电源改造^[2],同时开展优化脱硫塔和采用高效除雾器改造。

本文在“燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制”系列文章^[2-5]的基础上,继续探讨大型燃煤电厂电除尘选型与细颗粒物PM₁₀(粒径低于10 μm颗粒物)和PM_{2.5}排放控制的关系。

1 电除尘选型分析

在过去100多年中,电除尘器的选型理论得到了非常多的发展,除常规修正的Deutsch公式选型模型外,表1列出了至今多个公开发表的工业电除尘选型模型^[6-9],这些选型模型都包含有经验参数,在实际的工业应用中很难对排放做出科学的预测和评估,也未能给出合理的改造方案。

从物理过程分析,这些模型基本可分为两大类:1)基于颗粒物迁移速度和电除尘比集尘面积的效率模型^[10-13],表1中模型1、3、4、5、7、8、9、10、11和12均属于此类模型,在应用时最大的困难来自对颗粒物迁移速度 ω 的选取和修正,各个电除尘厂家根据自己的经验运行参数库,通过类比的办法开展电除尘设计和选型,实际排放与理论预测偏差较大,也正因此,近期国内电除尘几乎都在改造中。2)基于电除尘运行电压和电除尘比集尘面积的效率模型^[2,14,15],表1中模型2、6和13均属于这类模型,模型2和6为电除尘分级效率与电除尘运行电场强度及粒径大小的选型模型,电除尘效率与颗粒物直径为正相关,电除尘总的除尘效率要通过颗粒物分布和分级效率开展预测和评估。实验研究表明,不同直径的颗粒物分级效率与电场强度几乎表现为相同的相关性,随场强的变

收稿日期:2015-05-27;修回日期:2015-06-22

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA065000);浙江省重点科技创新团队计划(2013TD07)

作者简介:梁志宏,高级工程师,研究方向为燃煤电厂运行和管理,电子信箱:17052573@shenhua.cc;闫克平(通信作者),教授,研究方向为环境科学与工程,电子信箱:kyan@zju.edu.cn

引用格式:梁志宏,李栓宝,陈俊峰,等. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制 VII:以 2×600 MW 机组为例分析讨论电除尘选型和改造[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 84-88; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.010

表 1 各种电除尘选型模型
Table 1 List of ESP sizing models

序号	电除尘选型模型	说明	年代
1	$\eta = 1 - \exp(-\omega_c \cdot SCA)^k$	ω_c 为颗粒物迁移速度, m/s;	1963
2	$\lg(1 - \eta) = \lg(1 - \eta_s) + C \cdot SCA \cdot d \cdot V^2$	η 为除尘效率 %;	1963
3	$\eta = 1 - \left(1 - \frac{\beta}{1 - \alpha}\right) \exp[-\omega(1 - \alpha) \chi \cdot SCA] - \frac{\beta}{1 - \alpha}$	SCA 为比集尘面积, $m^2 \cdot m^{-3} \cdot s$; k 为经验系数 0.4~0.6;	1967
4	$1/(1 - \eta) = (1 + b \cdot SCA \cdot \omega_b)^{1/b}$	η_s 为起晕电压下除尘效率, %;	1967
5	$\eta = 1 - \exp\left\{\left[\alpha - (\alpha^2 + 2\beta)^{\frac{1}{2}}\right] \cdot l\right\}$	V 为工作电压, kV; d 为颗粒物直径, m;	1971
	或 $\eta = 1 - \exp\left(\frac{\beta}{\alpha} \cdot l - \frac{(1-f)wL}{vb}\right)$ 式中: $\alpha = \frac{bv}{2D}$, $\beta = (1-f) \cdot \frac{bw}{2D}$, $l = L/b$.	C, α, β 和 χ 为经验系数; $b \approx 0.22$ 。 B 为通道半宽, m; v 为平均流速, m/s; D 为颗粒物的扩散系数, m^2/s ; f 为颗粒物因气流与因静电力收集移动距离之比; ω 为仅静电力引起的迁移速度, m/s; L 为电除尘长度, m。	
6	$\eta(d_p) = 1 - \exp\left\{\frac{SCA \cdot \epsilon_0 E_{ac}^2 C d_p}{3\mu} \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \frac{2(\kappa - 1)}{\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)(\kappa + 2)}\right]\right\}$	d_p 为颗粒物直径, m;	1975
7	$\eta = 1 - \exp(-\omega_c \cdot SCA) F = 1 - \exp(-\omega_c L/bv) F$	ϵ_0 为真空介电常数;	1980
	其中 $F\left(\frac{\omega_c}{v}, P_c\right) = \left(\frac{v}{\omega_c}\right)^2 \frac{P_c}{2} \left\{ \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{v}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{2\theta}{P_c}\right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}$	E_{ac} 为平均电场强度;	
8	$\eta = 1 - \frac{\sqrt{P_c}}{2b\sqrt{\pi D_c}} \int_0^b \exp\left[-\frac{P_c}{4D_c} \left(\frac{y}{b} - D_c\right)^2\right] dy$	C 为修正系数;	1994
	或 $\eta = 1 - \frac{\sqrt{P_c}}{2\sqrt{\pi D_c}} \exp\left[-\frac{P_c}{4D_c} (\alpha - D_c)^2\right]$	μ 为流体黏度系数;	
9	$\eta(d_p) = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} C_m \exp\left(-\frac{\omega_c L}{v} \frac{F_m}{b}\right) \frac{\sin \theta_m}{\theta_m} \exp\left(\frac{P_c}{2}\right)$	λ 为气体自由程;	1995
10	$\eta = 1 - \exp(-\omega_c L/bv) F$	κ 为颗粒物的相对介电常数;	2002
	其中 $F\left(\frac{\omega_c}{v}, P_c\right) = \frac{v}{\omega_c} \frac{P_{ex}}{2} \left\{ \left[1 + \frac{\omega_c}{v} \frac{P_{ey}}{P_{ex}} \left[1 + \left(\frac{2\theta}{P_{ey}}\right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}$	P_c 为 Pectel 数 ($P_c = wblD$);	
11	$\eta = 1 - 1.042 \exp(-N_{De}^{0.612})$	D 为流体系数;	2010
12	$\eta = 1 - \exp(-A \cdot N_{De}^B) + C \cdot N_{De} - (1 - \alpha)$	$N_{De} = \omega_c \cdot SCA$;	2012
13	$\lg \frac{1 - \eta}{\beta} = -\alpha \cdot E_a \cdot E_p \cdot SCA$	$\alpha \approx 0.46 \sim 0.6$;	2012

化除尘效率受离子风的影响表现出两个不同的区域^[15], 模型 13 是最接近实际工业电除尘应用的, 颗粒物特性及入口浓度对除尘效率的影响体现在参数 α 和 β 及运行电场强度。

采用迁移速度选型时, 电除尘效率随电除尘比集尘面积

增大而提高, 当烟气风量一定时, 欲提高电除尘效率, 只能增加收尘极板面积以增大比集尘面积来提高除尘效率。基于电除尘运行参数模型或电除尘指数选型模型是根据电除尘运行时的指数大小来评估电除尘的排放, 电除尘指数的大小

反映了颗粒物特性、本体设计、烟气温度及电源特性等,如本文讨论的电除尘改造,提高电除尘效率不一定意味着要提高电除尘的比集尘面积,只要提高电除尘的运行指数就可提高除尘效率。

2 电除尘改造

为适应近年来的煤炭市场的变化,2010年对锅炉改造后,电厂的燃煤不仅有当地的贫煤,也掺烧40%~60%的内蒙及陕西烟煤,掺烧后典型的灰成分(质量分数):SiO₂为57.65%、Al₂O₃为27.07%、Fe₂O₃为6.15%、CaO为3.68%、MgO为0.8%、Na₂O为0.68%、K₂O为1.77%、TiO₂为1.12%、SO₃为0.38%、MnO₂为0.021%,灰样变形温度为1360℃、软化温度为1390℃、半球温度为1400℃、流动温度为1410℃。烟气流量约为193.6万Nm³/h、烟气温度为110~120℃、烟尘入口质量浓度20g/Nm³左右,烟气成分组成(质量分数):O₂为4.88%、CO₂为20.17%、H₂O为3.63%、N₂为71.16%、NO_x和SO₂分别为490mg·Nm⁻³和800mg·Nm⁻³。图1为电除尘改造前后极板、极线的积灰情况。原设计的顶部振打系统不适应电厂的运行,极板极线清灰不理想,电除尘器第1及第2电场的二次电流几乎为零。表2为电除尘器改造前后参数。2台锅炉每台对应一套电除尘器,每套电除尘器为4个烟道、5个电场。改造仅针对第1、2电场,第3~5电场仍为针刺阴极线、ZT24阳极板,第1~5电场阴极线振打方式全部为顶部振打。

此外,高含量SiO₂和Al₂O₃(≥84%)将增加比电阻,降低迁移速度。若要实现电除尘出口烟尘排放低于20mg·Nm⁻³,传统的电除尘模型仅要求对电除尘本体放大改造,比集尘面积

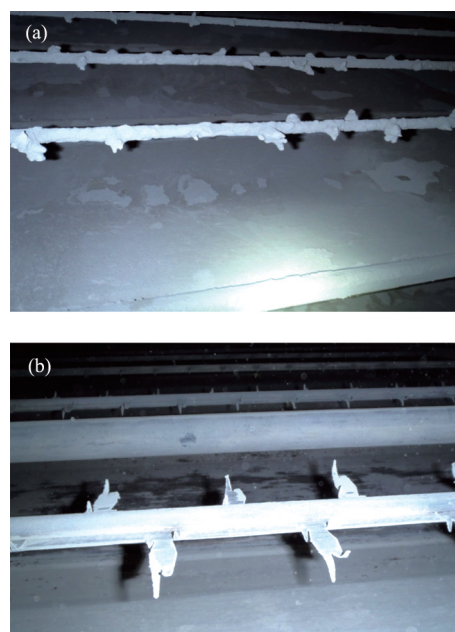


图1 电除尘改造前(a)后(b)极板极线的积灰情况
Fig. 1 Collected ash on high-voltage and grounded electrodes before (a) and after (b) upgrading

需高于130m²·m⁻³·s⁻¹。而根据电除尘指数模型及电厂的实际场地、改造费用等因素,在实际改造中主要更换第1、2电场的振打系统、减小极板面积。改造后电除尘运行正常,达到预计效果,表明以电除尘指数为改造选型依据,其效果优于基于烟尘迁移速度的模型方法。

表2 电除尘器改造前后设计参数
Table 2 ESP Specifications

项目	比集尘面积/%	阴极线型式	阳极板型式	阳极板振打	输出电压/kV	输出电流/mA
改造前	100	针刺线	ZT24板	顶部	66~72 三相	800~1000
改造后	92.5(1号炉) 95(2号炉)	RS线	C480	侧部	80~82 三相	800~1200

3 PM₁₀和PM_{2.5}排放

图2为改造后典型的电除尘二次电压及二次电流的运行参数,图3为各电场二次收集板电流密度的相对比例,图4为采用静电低压撞击器^[2,14](electrical low pressure impactor, ELPI)测试电除尘出口PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度分布,一号炉的PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度分别为14.47mg·Nm⁻³和0.94mg·Nm⁻³,二号炉的PM₁₀和PM_{2.5}分别为10.18mg·Nm⁻³和0.75mg·Nm⁻³,两台炉的PM₁₀都低于15.0mg·Nm⁻³,PM_{2.5}都低于1.0mg·Nm⁻³,PM_{2.5}占PM₁₀的比例在6.5%~7.5%左右。

理想电除尘运行原理是从第1到第5电场,电除尘的运

行电流密度逐渐降低^[5]。在相同电流条件下,电除尘器二次电压从前电场到后电场随烟尘浓度的降低而降低,粉尘浓度越低对应的二次电压越低。电除尘实际运行电压应通过优化控制,使运行电流自动跟踪。从而在实现电除尘器节能的同时,进一步抑制离子风引起的烟尘二次飞扬^[15]。此外,对黏性大或比电阻高的烟尘,如图3所示,电除尘的第1电场会因火花率高而降低运行电流以优化除尘效率。

第1、2电场的本体改造不仅包括振打系统改造,还将电场有效长度从4m降至3~3.5m,两台炉的比集尘面积则分别下降至原来的95%和92.5%。1、2号炉电除尘出口的排放和

相对板电流密度表明,电除尘比集尘面积的降低并未影响电除尘器排放质量浓度。比集尘面积越小,运行电流密度反而有所提高,从而降低了PM₁₀和PM_{2.5}的排放,这一现象与传统的电除尘理论有所不同。

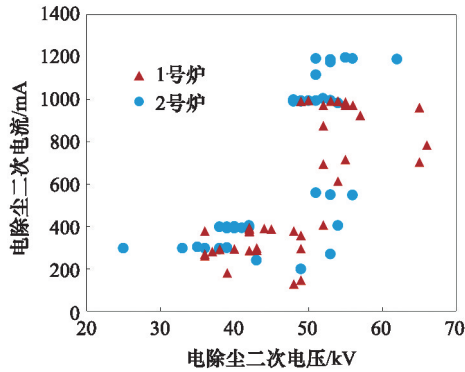


图2 典型的二次电压和二次电流运行参数

Fig. 2 Typical secondary voltage and current of ESPs

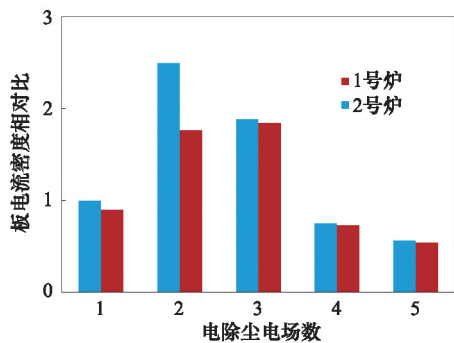


图3 典型的各电场二次电流的相对比(以2号炉第1电场为基准)

Fig. 3 Ratios of secondary current density in various fields (based on the current density in 1st field of 2nd boiler)

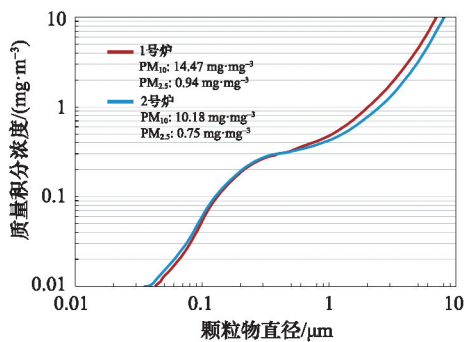


图4 电除尘出口两台炉PM₁₀的质量积分分布

Fig. 4 Cumulative mass distribution of PM₁₀ at ESP outlets

4 结论

分析了2×600 MW电除尘本体和电源的改造,结果表明:

- 1) 对黏性和比电阻较大的烟尘,电除尘器第1和第2电场应采用侧部振打;
- 2) 传统电除尘选型模型难以准确预测电除尘的运行,以电除尘指数为指导,提高电除尘运行电流、电压是降低烟尘排放的关键;
- 3) 五电场电除尘器采用40套三相高压电源供电时,电除尘出口PM₁₀和PM_{2.5}排放可控制在15 mg·Nm⁻³和1.0 mg·Nm⁻³以下,PM_{2.5}占PM₁₀的比例在6.5~7.5%。

参考文献 (References)

- [1] 肖创英. 促进燃煤电厂烟尘超低排放[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 12.
Xiao Chuangying. Technical progress for achieving low particle matter emission from coal-fired power plant [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 12.
- [2] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制I: 电除尘选型及工业应用[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 23-33.
Wang Shilong, Chen ying, Han Ping, et al. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator(ESP) for coal-fired power plants I: ESP sizing and application[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 23-33.
- [3] 王仕龙. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制II: 电除尘电源改造与PM₁₀和PM_{2.5}的排放, 以660 MW机组为例[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 34-38.
Wang Shilong. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator(ESP) for coal-fired power plants II: evaluation of ESP upgrading in terms of PM₁₀ and PM_{2.5} emission reduction with a 660 MW generator[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 34-38.
- [4] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制III: 电除尘电源及小分区改造与PM₁₀和PM_{2.5}的排放(以4×330 MW机组为例)[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 39-42.
Wang Shilong, Chen ying, Han Ping, et al. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants III: application with a 4×330 MW power plant[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 39-42.
- [5] 马元坤, 秦松, 陈亮, 等. 燃煤电厂电除尘PM₁₀和PM_{2.5}的排放控制V: 以660 MW机组为例分析讨论高压电源运行优化[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 69-72.
Ma Yuankun, Qin Song, Chen Liang, et al. PM₁₀ and PM_{2.5} emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired Power Plants V: Optimization of HV power source with 660 MW boiler [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(6): 69-72.
- [6] White H J. Industrial electrostatic precipitation[M]. Boston: Addison Wesley, 1963.
- [7] Oglesby S. Electrostatic precipitation [M]. New York: Marcel dekker INC Press, 1978.
- [8] Parker K R. Applied electrostatic precipitation [M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [9] Huang Y, Li S, Zheng Q, et al. Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM_{2.5} emission control from coal-fired boilers[J]. International Journal of Plasma Environmental Science & Technology.
- [10] 郦建国, 刘云. 中国煤种成分对电除尘器性能影响及电除尘器适应性评价[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 104-109.
Li Jianguo, Liu Yun. The effect of compositions of domestic coal on the performance of ESP and an evaluation of ESP adaptability [J].

- Science & Technology Review, 2010, 28(7): 104–109.
- [11] 陈国策. 适应新排放标准的火电厂除尘技术[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 90–95.
Chen Guoqu. Dust control technologies under the new emission standard for thermal power plants[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 90–95.
- [12] Li X, Zhang X, Zhu J, et al. Sensitivity analysis on the maximum ash resistivity in terms of its compositions and gaseous water concentration [J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70: 83–90.
- [13] Li S, Li X, Huang Y, et al. Fly ash resistivity: influencing factors, predicting models and its impacts on electrostatic precipitator performance[M]//Sarker P K, Fly ash, sources, applications and potential environmental impacts, New Yorks: NOVA Science Publishers, 2014: 91–144.
- [14] Zhu J, Zhao Q, Yao Y, et al. Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(3): 285–291.
- [15] 沈欣军, 郑钦臻, 宁致远, 等. 燃煤电厂电除尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放控制IV: 采用二维PIV除尘[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 43–50.
Shen Xinjun, Zheng Qinzen, Ning Zhiyuan, et al. PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants IV: Investigation on electrostatic precipitation by means of 2D PIV technique[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(33): 43–50.

PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission control by electrostatic precipitator (ESP) for coal-fired power plants VII: ESP sizing and refitting with 2×600 MW boilers

LIANG Zhihong¹, LI Shuanbao¹, CHEN Junfeng¹, ZHANG Jinhai¹, CHEN Baorui¹, XUE Xiangzhong¹, WANG Shilong², YAN Keping³

1. Wangqu Power Plant, Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Lucheng 047500, China
2. Shenhua Guoneng Energy Group Corporation Limited, Beijing 100033, China
3. Key Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract This paper discusses electrostatic precipitator (ESP) sizing, refitting and upgrading with 2×600 MW coal-fired boilers. Each boiler is equipped with two five-fields ESPs and 40 high-voltage (HV) power sources. Upgrading the HV power source refers to replacing the 80 single-phase HV sources by using 80 three-phase HV sources. Refitting ESP mainly includes changing both HV and collection electrodes and their rapping systems of the first and second electrical fields. PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission concentrations at ESP outlets drop below $15 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ and $1.0 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$, respectively. The $PM_{2.5}$ to PM_{10} ratio is around 6.5%~7.5%. In comparison with previous emission, $PM_{2.5}$ concentration drops down by more than 95%.

Keywords electrostatic precipitation; $PM_{2.5}$; three-phase T/R power source

(编辑 田恬)